

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

ГЛАДЬО СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 620.16: 539.42: 539.43

**ОЦІНКА ВПЛИВУ ДОРНУВАННЯ ОТВОРІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ
ЕЛЕМЕНТІВ КРИЛА ТРАНСПОРТНОГО ЛІТАКА**

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя

Науковий керівник: **Ясній Петро Володимирович**, доктор технічних наук, професор, ректор, завідувач кафедри будівельної механіки, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль

Офіційні опоненти: **Силованюк Віктор Петрович**, доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу фізичних основ руйнування та міцності матеріалів Фізико-механічний інститут ім. І.В. Карпенка НАН України, м. Львів

Побережний Любомир Ярославович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімії Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ

Захист відбудеться ”__” _____ 2015р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті ім. І. Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

Автореферат розісланий ”__” _____ 2015р

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Б. Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема втоми матеріалів і конструкцій набула особливого значення завдяки швидкому розвитку багатьох галузей промисловості, таких як авіабудування, автомобільне і машинобудування. Вимоги безпечної експлуатації конструкцій мають особливе значення за циклічного навантаження і високих напружень.

Аналіз літературних джерел показав, що в ряді випадків існуючі технологічні методи обробки є ефективним засобом підвищення втомної довговічності конструктивних елементів з одиничними отворами. Більшість з них полягає в обробці елементів конструкції в зоні отворів шляхом пластичного деформування шару матеріалу. Дослідженням ефективності впливу поверхневого пластичного деформування на параметри поверхні елементів конструкцій займалися Трощенко В.Т., Панасюк В.В., Харченко В.В., Осташ О.П., Подрезов Ю.М., Голубець В.М., Сулим Г.Т., Волчок І.П., Никифорчин Г.М., Алієв І.С., Кир'ян В.І., та ін.

Дослідженнями в даному напрямку займаються провідні науково-дослідні установи, інститути, а також науково-технічні комплекси виробників і користувачів авіаційної і аерокосмічної техніки, зокрема "Boeing", "Airbus", "NASA", "NAVAL". АНТК ім. К.О. Антонова, тощо. Довговічність силових конструктивних елементів з отворами досліджували Г.А. Кривов, С.А. Бычков, Е.Т. Василевский, В.А. Резник, А.М. Гуменный, С.П. Светличный. Зокрема, В.А. Матвієнко та В.А. Гребеников дослідили вплив методів комбінованого поверхневого зміцнення (дорнування з наступним бар'єрним обтискуванням) на характеристики локального НДС стрингера з отворами для перетікання палива. В.Е. Панкратов, С.Н. Михеєнко, Р.Н. Шадура проводили кількісну оцінку первинних похибок у формуванні точності дорнування. Позитивний вплив дорнування в елементах конструкції з отворами на довговічність, мікротвердість, шорсткість, залишкові напруження стиску підтверджено у працях В.В. Воронько, Ю.А. Воробйова, В.Н. Степаненко, В.Ф. Скворцова, А.Ю. Арляпова, Н.Д. Gopalakrishna, Н.Н. Narasimha Murthy, М. Krishna, М.С. Vinod, А.В. Suresh, Т.Ю. Степанова.

Зокрема, в працях науковців із Бангалора (Індія) досліджено вплив технології холодного дорнування отворів в пластині із алюмінієвого сплаву 2024. Для дорнування використовували розрізну пружинну втулку, яку розміщали в отворі і через яку протискували шток з конічною ділянкою або шток з кульовим наконечником. Показано, що максимальні залишкові стискувальні напруження і втомна довговічність (у 5,3 рази більша ніж для отвору без зміцнення) досягаються при розширенні отвору до 5%.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу дисертації увійшли результати експериментальних і теоретичних досліджень, які отримані при роботі над держбюджетною темою "Вплив конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів на довговічність силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами" (№ державної реєстрації роботи: 0113U000249). Ця тема виконується у Тернопільському

національному технічному університеті імені Івана Пулюя з 2013 року, згідно тематичних планів НДР Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення міцності та втомної довговічності силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами за рахунок створення залишкових напружень стиску в поверхневих шарах циліндричної поверхні отвору. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- дослідити вплив натягу дорнування функціональних отворів на втомну міцність пластин із алюмінієвого сплаву за сталої амплітуди навантаження;
- дослідити вплив діаметра пластично-деформованих отворів на циклічну міцність пластин із алюмінієвого сплаву за сталої амплітуди навантаження;
- дослідити вплив натягу дорнування на кінетику та мікромеханізми росту тріщин в силових конструктивних елементах крила транспортного літака;
- змоделювати вплив натягу дорнування функціональних отворів на залишковий напружений стан силових конструктивних елементів крила транспортного літака;
- змоделювати пружно-пластичне циклічне деформування пластин з функціональними отворами після дорнування;
- обґрунтувати критерії втомної міцності силових конструктивних елементів крила літака із зміцненими функціональними отворами;
- розробити конструктивно-технологічні рекомендації для підвищення міцності, втомної довговічності та живучості силових конструктивних елементів крила транспортного літака.

Об'єктом дослідження є силові конструктивні елементи крила транспортного літака.

Предметом дослідження є вплив поверхневого пластичного деформування (ППД) на втомну міцність та довговічність силових конструктивних елементів з функціональними отворами крила транспортного літака.

Методи дослідження. В основу методики оцінки втомної довговічності силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами з урахуванням ППД за сталоамплітудного навантаження були закладені результати власних та відомих аналітично-експериментальних досліджень:

- методики експериментальних досліджень циклічної тріщиностійкості сплавів за регулярного навантаження;
- методики експериментальних досліджень впливу попереднього пластичного деформування на характеристики механічних властивостей матеріалу;
- методика визначення залишкових стискувальних напружень після ППД отворів;
- методики оцінки мікроструктури попередньо деформованого матеріалу, мікромеханізмів зародження та поширення втомних тріщин з використанням електронної мікроскопії;
- методики моделювання МСЕ НДС в околі отвору до та після дорнування, а також за сталоамплітудного навантаження.

Використання модернізованої електрогідравлічної машини СТМ-100 керованої ПК, пристроїв спостереження за поширенням тріщини, растрового електронного

мікроскопу дало змогу отримати необхідну точність і достовірність результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів.

- виявлено основні закономірності зародження та поширення втомних тріщин у зоні функціональних отворів крила транспортного літака після зміцнення циліндричної поверхні отворів дорнуванням;
- виявлено вплив натягу дорнування на залишковий НДС пластин з отворами з урахуванням діаметра отвору;
- досліджено кінетику напружено-деформованого стану пластин із зміцненими отворами за циклічного навантаження з урахуванням натягу дорнування і залишкових напружень;
- розроблено методику розрахунку МСЕ розмаху локальних напружень в околі функціонального отвору після дорнування та циклічного одновісного розтягу;
- обґрунтовано критерії втомного руйнування конструктивних елементів крила транспортного літака із зміцненими функціональними отворами.

Практичне значення одержаних результатів.

Запропонована методика розрахунку МСЕ комплексного впливу попереднього пластичного деформування функціональних отворів силових конструктивних елементів крила транспортного літака на зародження і поширення втомних тріщин з урахуванням діаметра.

Запропонована методика прогнозування періоду зародження втомної тріщини з урахуванням залишкових напружень стиску після поверхневого пластичного зміцнення за сталоамплітудного навантаження силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами.

Розроблено практичні рекомендації з вдосконалення технології зміцнення пластичним деформуванням функціональних отворів силових конструктивних елементів крила транспортного літака.

Результати дисертаційної роботи, в частині методики прогнозування періоду зародження втомної тріщини та повного руйнування з урахуванням залишкових стискаючих напружень після поверхневого пластичного зміцнення за сталоамплітудного навантаження, використовуються лабораторією випробувань на міцність АНТК ім. О.К. Антонова при розрахунках живучості силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами, а також при визначенні характеристик циклічної тріщиностійкості алюмінієвих сплавів.

Особистий внесок здобувача. Основу дисертаційної роботи складають результати, які отримані автором самостійно. В друкованих працях, написаних у співавторстві, автору належить:

- розроблення і реалізація технології дорнування пластин із функціональними отворами;
- розроблення методики розрахунку методом скінчених елементів напружено-деформованого стану в околі отвору після дорнування, а також за циклічного навантаження;

- виявлення закономірностей впливу відносного натягу дорнування на циклічну міцність та довговічність силових конструктивних елементів крила транспортного літака;

- дослідження мікромеханізмів зародження та поширення втомних тріщин у конструктивних елементах крила транспортного літака з функціональними отворами із дорнуванням та без нього;

- розроблення методики прогнозування довговічності до зародження втомної тріщини у конструктивних елементах крила транспортного літака з функціональними отворами з урахуванням впливу відносного натягу дорнування та діаметра отвору.

Науковий керівник роботи брав участь у формулюванні задач, обговоренні, аналізі, трактуванні одержаних результатів та можливостей їх практичного застосування.

Апробація результатів дисертації. Основні результати, викладені в дисертаційній роботі, доповідались і обговорювались на V Міжнародній конференції з елементами наукової школи для молоді (Тамбов, 2010 р.), науково-технічній конференції МТФ ТНТУ ім. І. Пулюя - "Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті" (Тернопіль, 2011 р.), 10-й Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів 2011 р.), II Міжнародній науково-технічній конференції "Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування" (Тернопіль, 2011 р.), XVII науковій конференції ТНТУ ім. І. Пулюя (Тернопіль, 2013 р.), Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій" (Тернопіль, 2013 р.), IV науково-технічній конференції "Інформаційні моделі, системи та технології" ТНТУ ім. І. Пулюя (Тернопіль 2014 р.).

Публікації. Результати проведених досліджень за тематикою дисертаційної роботи опубліковані в 13 друкованих працях. З них - 6 статей у фахових виданнях з переліку МОН України, одна з яких входить в наукометричну базу Scopus. 1 стаття у виданні не з переліку МОН України, 6 як тези і матеріали доповідей науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 123 сторінок, в т. ч. 48 рисунків, 6 таблиць та список використаних літературних джерел із 117 найменувань.

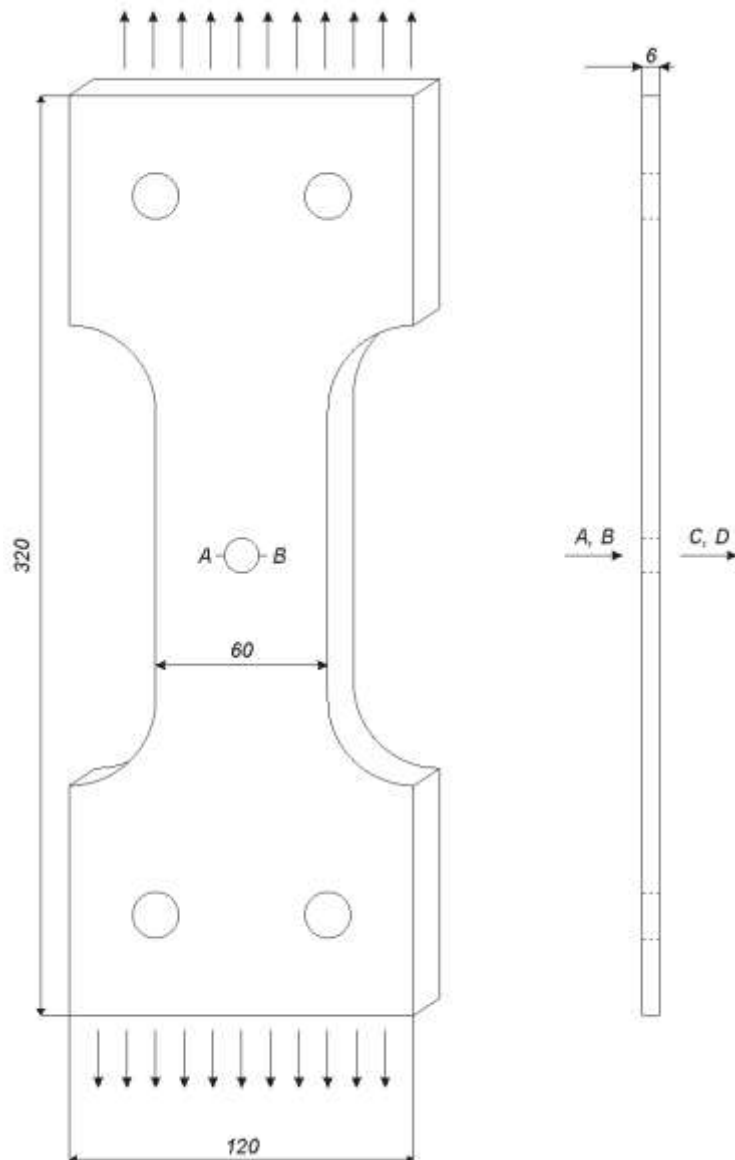
ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано мету дослідження методи її досягнення, наукову новизну роботи, її практичне значення та апробацію результатів.

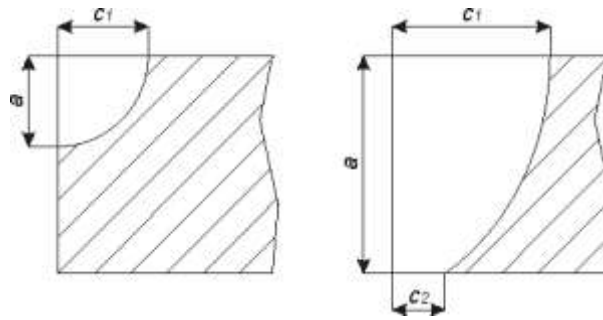
У першому розділі проаналізовано літературні джерела по тематиці близькій даній роботі. Зокрема методи поверхневого пластичного зміцнення шару матеріалу та його вплив на параметри циклічної тріщиностійкості. Розглянуто основні місця ймовірного втомного руйнування силових елементів конструкції крила

транспортного літака. На підставі огляду літературних джерел сформульовано основні напрямки досліджень.

В другому розділі дисертаційної роботи описано розроблені методики досліджень. Випробування втомую проводили на сервогидравлічній машині типу СТМ-100, керованій за допомогою ПК. Досліджували алюмінієвий сплав Д16чТ за сталоамплітудного циклічного одновісного розтягу. Веслоподібні зразки з центральним отвором для випробувань втомую виготовляли з прокатних листів алюмінієвого сплаву Д16чТ товщиною 6 мм (рис. 1а). Для позначення місця зародження втомної макротріщини використовували символи А, В, С, D. Відповідно А і В – це лицева сторона зразка (вхід дорна), С і D – тильна сторона зразка (вихід дорна). Розміри а (на циліндричній поверхні отвору), с1 (на вході дорна) та с2 (на виході дорна) використовувалися для характеристики швидкості поширення та форми фронту тріщини (рис. 1б).



а



б

Рис. 1 – Креслення зразка для випробування втому та напрямом дорнування (а),
схема поширення тріщини (б)

Для поверхневого пластичного деформування циліндричної поверхні отворів використовувалося квазістатичне дорнування. Для квазістатичного дорнування зразків використовували прес РҮЕ-100.

Довговічністю до зародження втомної макротріщини вважали таку кількість циклів, коли на поверхні зразка з'явиться видима тріщина довжиною 0,25 мм. За зародженням та поширенням втомних тріщин спостерігали використовуючи дві системи змонтовані на базі промислової телевізійної установки ПТУ-44 (рис. 2).

Мікрогеометрію поверхні руйнування було досліджено на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И.

Для дослідження НДС в околі функціонального отвору під час і після дорнування з різним відносним натягом була створена скінченно-елементна модель чверті досліджуваного плоского зразка з центральним отвором.

НДС аналізували за наступними параметрами:

- максимальні локальні напруження σ_{\max} за одновісного циклічного розтягу;
- залишкові напруження після дорнування σ_{res} ;
- напруження після дорнування та одновісного циклічного розтягу $\sigma_{res+cycle}$.

Сітка скінчених елементів для моделей була створена за допомогою елемента Solid95 (рис. 3).

Для дослідження перебігу дорнування отвору використовувався комплекс нелінійної динаміки ANSYS Explicit Dynamics.

Для задання діаграми деформування матеріалу Д16чТ використовується модель Steinberg Guinan Strength, яка базується на формулі:

$$G = G_0 \left[1 + \left(\frac{\dot{G}_P}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{\dot{G}_T}{G_0} \right) (T - 300) \right], \quad (1)$$

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2_0} [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n \left(1 + \frac{\sigma'_{0,2P}}{\sigma_{0,2_0}} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{\dot{G}_T}{G_0} \right) (T - 300), \quad (2)$$

$$\text{при умові, що } \sigma_{0,2_0} [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n \leq \sigma_{0,2_{max}} \quad (3)$$

де, G_0 – модуль зсуву у первісному стані ($T = 300\text{K}$, $P = 0$, $\varepsilon = 0$); $\dot{G}_P = dG/dP$; $\dot{G}_T = dG/dT$; P – тиск; η – коефіцієнт стиснення; T – температура; $\sigma_{0,2}$ – границя текучості; $\sigma_{0,2_0}$ – границя текучості у первісному стані ($T = 300\text{K}$, $P = 0$, $\varepsilon = 0$); β – коефіцієнт зміцнення; ε – пластична деформація; ε_i – початкова еквівалентна пластична деформація; n – експонента зміцнення.

В третьому розділі оцінювали вплив параметрів дорнування та діаметру отворів на довговічність до зародження та швидкість поширення поверхневих втомних тріщин. Виявлено, що довговічність до зародження втомної тріщини від отворів у зразках підвищується із збільшенням відносного натягу дорнування. Отримано основні залежності довговічності до зародження видимої на кромці отвору втомної макротріщини довжиною $\approx 0,25$ мм та кількості циклів до зруйнування зразка від натягу дорнування для отворів діаметром 8 мм та 10 мм.

Проаналізовано поверхню втомного руйнування зразків з дорнованими і не дорнованими отворами. Виявлено, що форма фронту і траєкторія поширення втомної тріщини в дорнованих і не дорнованих зразках з отворами відрізняється.

Фронт втомної тріщини в зразках з отворами після механічної обробки наближений до півеліптичного. Тріщина зароджується переважно в середині (по товщині) ділянці отвору і поширюється в тіло зразка. Фронт тріщини набуває півеліптичної форми.

В дорнованих зразках тріщина виникає на кромці отвору, переважно з боку входу дорна в отвір, і поширюється в тіло зразка. Фронт тріщини спочатку набуває чвертьеліптичної форми, а в подальшому стає півеліптичним. Треба зазначити, що втомна тріщина в зразках з дорнованими отворами спочатку не виходить на тильну поверхню в околі отвору, а проростає до протилежної стінки зразка на відстані 1-2 мм від отвору. При цьому залишається тонка незруйнована смужка вздовж отвору, товщиною 1-2 мм. Такий ефект виникає внаслідок дії залишкових стискувальних напружень в околі отвору дорнованих зразків.

На стадії усталеного росту втомної тріщини формуються виражені втомні борозенки, розміщені окремими терасами. На поверхні зламу чітко видно гребені, що розділяють тераси з втомними борозенками.

За допомогою розрахунку МСЕ побудовано графіки розподілу залишкових стискаючих напружень в околі функціональних отворів діаметрами 8 мм (рис. 2а), 10 мм (рис. 2б) та 12 мм (рис. 2в) після дорнування з відносними натягами 1%, 2%, 3%. Виявлено, що залишкові напруження зосереджені здебільшого в середній по товщині ділянці отвору та ближче до сторони виходу дорна.

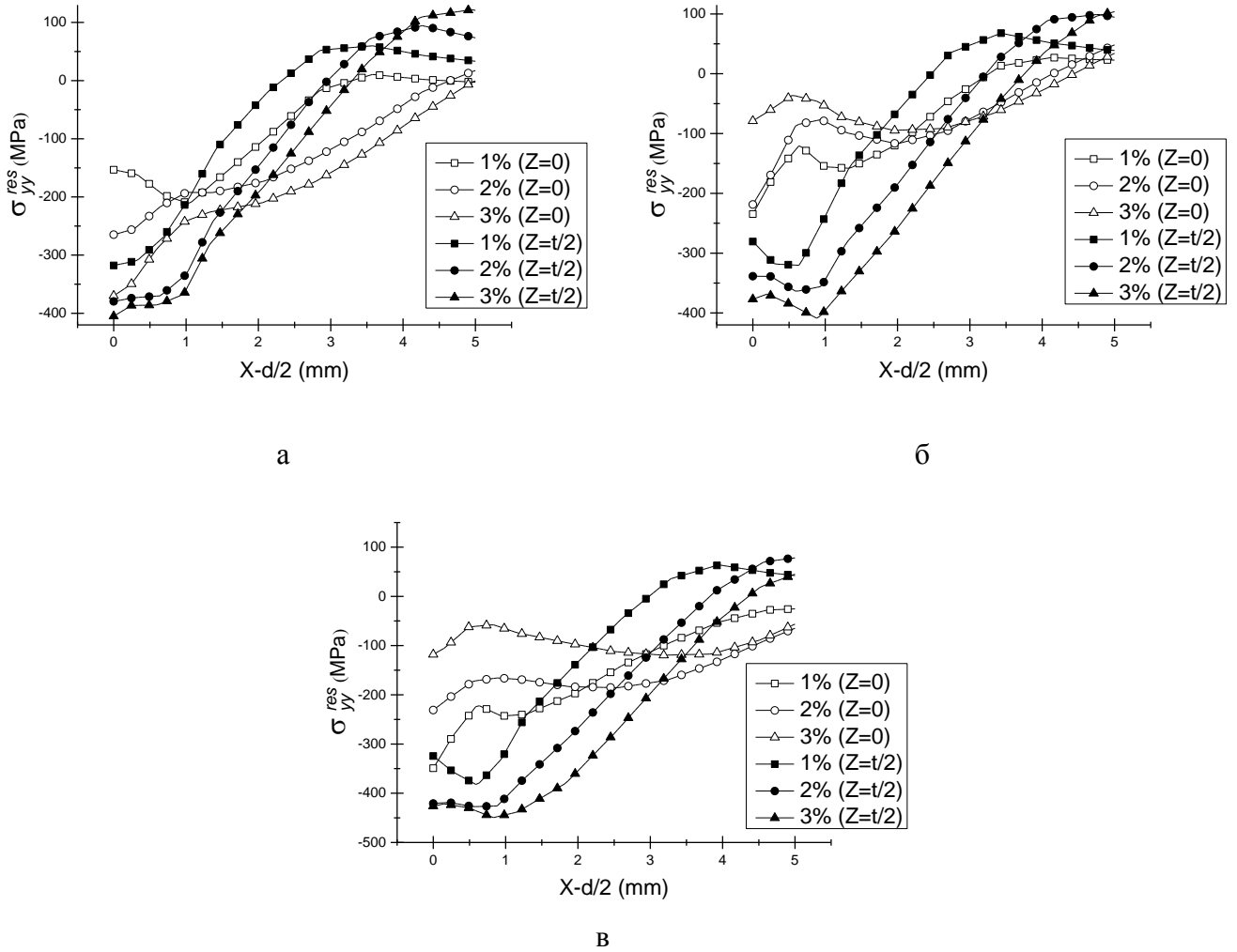


Рис. 2 – Залишкові напруження стиску в околі функціональних отворів діаметром 8 мм (а), 10 мм (б) та 12 мм (в) після дорнування з натягом 1%, 2%, 3% на глибині $Z = 0$ (вхід дорна) та $Z = t/2$ (середня по товщині ділянка зразка).

Для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень нормального відриву K використовували методику Newman та Raju.

Відповідно K визначається за формулою:

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \cdot F_{ch} \left(\frac{a}{c_1}, \frac{a}{t}, \frac{r}{t}, \frac{r}{W}, \frac{c_1}{W}, \varphi \right) \quad (4)$$

де σ – це нетто напруження розтягу; t – товщина зразка; $2W$ – ширина зразка; r – радіус отвору; φ – кут між положенням тріщини по відношенню до лицевої сторони; Q – поправочний коефіцієнт форми концентратора; функція F_{ch} – це поправочний коефіцієнт для кутової тріщини у пластині; a, c_1 – довжини видимої тріщини.

Побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування для ΔK та ΔK_{eff} відповідно у координатах РВТ- ΔK та РВТ- ΔK_{eff} у подвійних логарифмічних координатах.

Виявлено, що швидкість росту втомної тріщини у зразках із алюмінієвого сплаву Д16чТ із отворами діаметром 8 мм та 10 мм у подвійних логарифмічних координатах має пропорційну залежність від розмаху КІН. Проте після дорнування отворів швидкість росту втомної тріщини майже не залежить від розмаху КІН при $\Delta K < 20 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ і є меншою від швидкості в недорнованих зразках. Із збільшенням розмаху КІН ($\Delta K > 20 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) швидкість росту втомної тріщини зростає і при $\Delta K = 52 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ досягає швидкості росту тріщини в недорнованому зразку.

Розмах коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK визначали формулою (4), де σ замінювали на розмах напружень $\Delta\sigma = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}$.

Розмах ефективного КІН визначали за формулою (4) замінивши $\Delta\sigma$ на $\Delta\sigma_{\text{eff}}$, яке обчислювали за формулою:

$$\Delta\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{op}} \quad (10)$$

де σ_{op} – напруженням відкриття тріщини.

В четвертому розділі описано результати розрахунку методом скінчених елементів локальних напружень в околі функціональних отворів діаметром 8 мм і 10 мм без дорнування за натягу дорнування 1%, 2%, 3% за одновісного циклічного розтягу.

Виявлено, що локальні максимальні σ_{yy}^{max} та мінімальні σ_{yy}^{min} напруження стабілізуються уже на 2 півциклі навантаження.

Побудовано розподіл розмаху максимальних σ_{yy}^{max} та мінімальних σ_{yy}^{min} напружень в околі функціонального отвору (рис. 3) діаметром 8 мм (рис. 3а) та 10 мм (рис. 3б) для 2 півциклу навантаження на поверхні отвору з боку входу дорна.

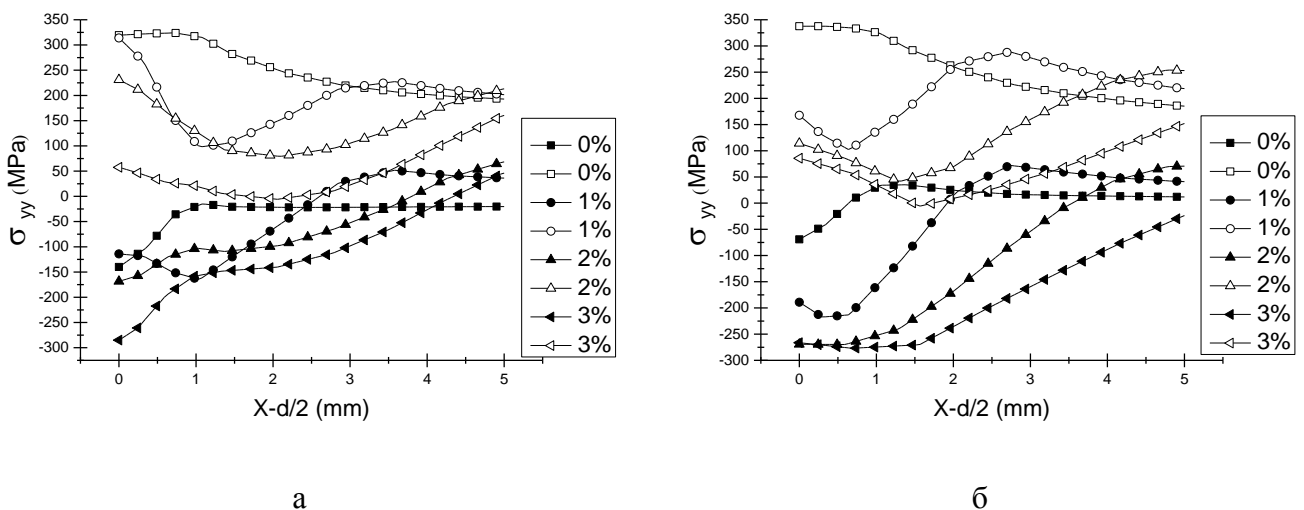


Рис. 3 – Розподіл розмаху максимальних σ_{yy}^{max} та мінімальних σ_{yy}^{min} напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (а) та 10 мм (б) для 2 півциклу навантаження на поверхні отвору з боку входу дорна.

Побудовано криві втоми алюмінієвих пластин зі зміцненими отворами від максимальних локальних напружень σ_{yy}^{max} (рис. 4) та від розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$ (рис. 5).

Залишкові напруження стиску більші для діаметру отвору 10 мм за натягу дорнування $i = 0\% \dots 3\%$ проти діаметру 8 мм і відповідно розмах локальних напружень також підвищується.

Виявлено, що довговічність пластин до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм від отвору діаметром 8 мм та 10 мм за натягу дорнування $i = 1\%$ підвищується у 1,5-3 разів проти недорнованих пластин з отворами. Аналогічна залежність спостерігається для дорнування з натягом $i = 2\%$. З подальшим підвищенням натягу дорнування (до $i = 3\%$) довговічність до зародження втомної тріщини підвищується у 7-10 разів проти недорнованих пластин з отворами.

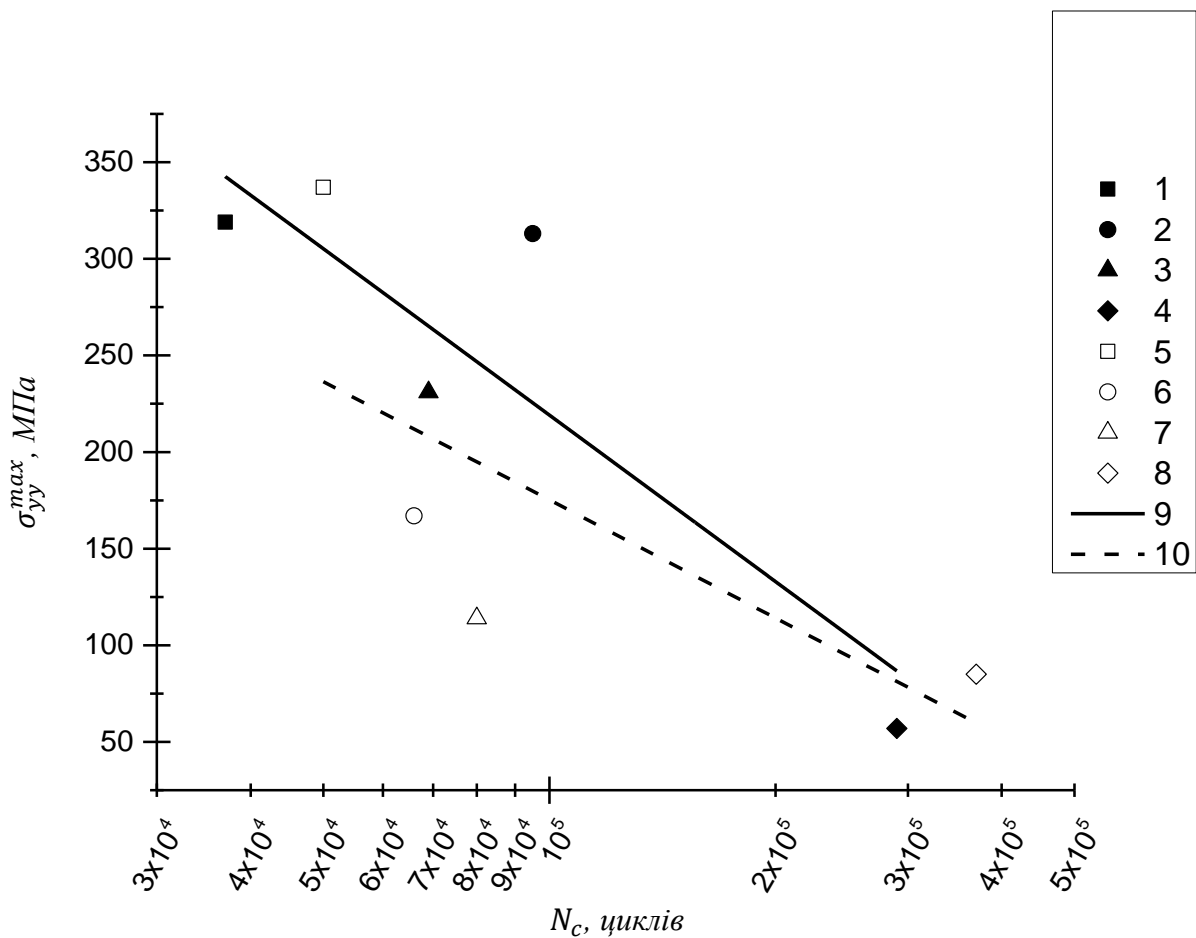


Рисунок 4 – Залежність кількості циклів до зародження втомної тріщини (довжиною 0,25 мм) на поверхні зразка ($Z = 0$) у пластинах з отвором від максимальних напружень σ_{yy}^{max} в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (1-4, 9) та 10 мм (5-8, 10) за натягу дорнування 0%(1,5), 1%(2,6), 2%(3,7), 3%(4,8)

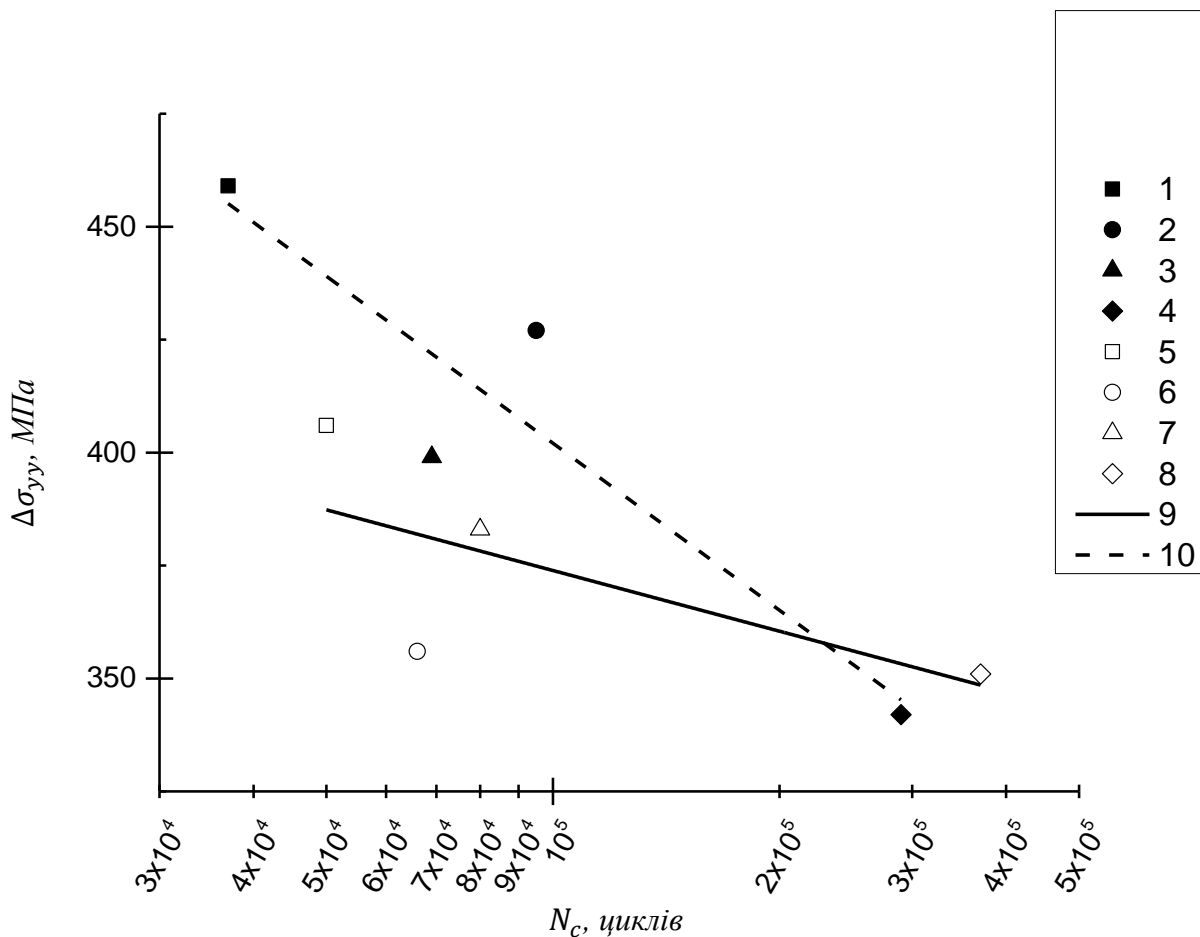


Рисунок 5 – Залежність кількості циклів до зародження втомної тріщини (довжиною 0,25 мм) на поверхні зразка ($Z = 0$) у пластинах з отвором від розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$ в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (1-4, 9) та 10 мм (5-8, 10) за натягу дорнування 0%(1,5), 1%(2,6), 2%(3,7), 3%(4,8)

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і вирішення наукової задачі, що полягає у підвищенні втомної довговічності силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами за рахунок створення залишкових напружень стиску в поверхневих шарах матеріалу в околі отвору.

1. Досліджено вплив натягу дорнування та діаметра функціональних отворів на довговічність пластин із алюмінієвого сплаву Д16чТ за сталої амплітуди навантаження. Виявлено, що дорнування з натягом $i = 1 - 2\%$ підвищує довговічність пластин до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у 1,5-3 рази проти недорнованих пластин. Зі збільшенням натягу дорнування (до $i = 3\%$) довговічність до зародження втомної тріщини підвищується у 7-10 разів проти недеформованих пластин з отворами.

2. Виявлено основні закономірності впливу натягу дорнування на кінетику та мікромеханізми росту тріщин в силових конструктивних елементах крила транспортного літака. На відміну від пластин із отворами після механічної обробки, тріщини в яких зароджуються в серединній ділянці отвору, в пластинах із

дорнованими отворами втомні тріщини зароджуються від кромки отвору з боку входу дорна. Для недорнованих зразків тріщина тривалий час проростає всередині пластини без появи на бічних поверхнях.

3. Досліджено вплив натягу дорнування функціональних отворів на залишковий напружений стан силових конструктивних елементів крила транспортного літака методом скінчених елементів. Із збільшенням величини натягу дорнування збільшуються залишкові напруження стиску, а також ширина ділянки стискувальних напружень біля отвору. Виявлено, що незалежно від натягу дорнування ($i = 1 - 3\%$) найменші локальні залишкові напруження стиску виникають з сторони входу дорна, а найбільші – у середній по товщині ділянці біля отвору, ближче до виходу дорна. Із збільшенням величини відносного натягу дорнування (від 1% до 3%) різниця між найменшими та найбільшими локальними залишковими напруженнями стиску по товщині пластини зменшується.

4. Методом скінчених елементів досліджено основні закономірності впливу пульсованого циклічного пружно-пластичного одновісного деформування пластин із зміцненими функціональними отворами на розподіл розмаху $\Delta\sigma_{yy}$, максимальних та мінімальних напружень σ_{yy}^{\max} та σ_{yy}^{\min} в околі отвору діаметром 8-12 мм за натягу дорнування $i = 1 - 3\%$. Розмах стабілізованих локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$ найменший за натягу дорнування 3% на кромці отвору, найбільший – у пластинах без зміцнення отворів.

5. Обґрунтовані критерії циклічної міцності силових конструктивних елементів із зміцненими функціональними отворами. Для прогнозування довговічності пластин із дорнованими отворами до зародження макротріщини запропоновано використовувати розмахи напружень на поверхні отвору $\Delta\sigma_{yy}$ та на відстані, що дорівнює ширині зони передруйнування d^* від поверхні отвору $\Delta\sigma_{yy}^*$.

6. Розроблено конструктивно-технологічні рекомендації для підвищення втомної довговічності силових конструктивних елементів крила транспортного літака. Виявлено, що оптимальним для алюмінієвого сплаву Д16чТ є дорнування з натягом 3% за рахунок створення високих залишкових напружень стиску на поверхні отвору, які значно зменшують максимальні напруження при циклічному навантажуванні. Це дозволяє у 7-10 разів підвищити довговічність до зародження втомної тріщини.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Фахові статті:

1. Ясній П.В. Формування залишкових напружень у пластинах з функціональними отворами після дорнування [Текст] / Ясній П.В., Гладь С.В., Скочиляс В.В., Семенець О.І. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – №6. – С.95-98.

2. Ясній П. Мікромеханізми поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві 2024-T3 [Текст] / Ясній П., Гладь С., Гуцайлюк В. // Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал "Машинознавство". – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2010. – №7. – С. 28-33.

3. Ясній П. Оцінювання мікропошкоджуваності отворів під потайні заклепки [Текст] / Ясній П., Гладь С., Гладь В. // Вісник Тернопільського національного технічного університету. Спеціальний випуск. Ч.1. – Тернопіль, 2011. – С. 23-29.

4. Ясній П.В. Дослідження мікроефектів руйнування алюмінієвого сплаву Д16чТ після поверхневого зміцнення [Текст] / Ясній П.В., Гладь С.В., Сорочак А.П. // Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал "Машинознавство". – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2013. – №3-4. – С. 16-19.

5. Ясній П. Вплив дорнування отворів на зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві [Текст] / Ясній П., Гладь С. // Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2014. – № 1. – С. 7-17.

6. Ясній П. Дослідження НДС силових конструктивних елементів з функціональними отворами за одновісного циклічного розтягу [Текст] / Ясній П., Гладь С., Сидор П., Семенець О. // Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2014. – № 3. – С. 7-14.

7. Ясній П. Вплив параметрів дорнування функціональних отворів на втомну довговічність силових конструктивних елементів крила літака [Текст] / Ясній П., Гладь С., Скочилас В., Семенець О. // Збірник праць. Т9:Сучасні проблеми техніки і технологій / Тернопільський осередок Наукового товариства ім. Шевченка / відп. ред.: М. Андрейчин, ред. тому: П. Ясній. – Тернопіль: Астон, 2014. – с.63-71.

Тези доповідей на науково-технічних конференціях:

1. Гуцайлюк В.Б. Микромеханизмы зарождения и развития усталостных трещин алюминиевого сплава 2024-T3 в условиях постоянного циклического нагружения [Текст] / Гуцайлюк В.Б., Гладь С.В. // Вестник Тамбовского университета. – 2010. – Т. 15, № 3. – С. 833-834.

2. П. Ясній Дослідження дефектів виготовлення отворів під потайні заклепки [Текст] / П. Ясній, С. Гладь, В. Гладь // Тези доповіді науково-технічної конференції МТФ ТНТУ ім. І. Пулюя - "Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті". – Тернопіль, 16 травня, 2011. – С. 3-4.

3. П. Ясній Оцінювання параметрів початкових мікродефектів конусних отворів [Текст] / П. Ясній, С. Гладь, В. Гладь // 10-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2011 – С. 118-120.

4. П. Ясній Вплив дорнування отворів на КІНЕТИКУ зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві Д16чТ [Текст] / П. Ясній, С. Гладь // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя:Том II. – "Матеріалознавство та машинобудування" – Тернопіль, 20-21 листопада, 2013. – С. 83.

5. П. Ясній Дослідження мікроефектів зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві Д16чТ [Текст] / П. Ясній, С. Гладь // Збірник тез доповідей "Актуальні задачі сучасних технологій" Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів: Тези доповідей. – Тернопіль, 11-12 грудня, 2013. – С. 58-59.

6. П. Ясній Моделювання процесу дорнування отворів в пластинах із алюмінієвого сплаву методом скінчених елементів [Текст] / П. Ясній, С. Гладь, В.

Скочиляс // Матеріали IV науково-технічної конференції "Інформаційні моделі, системи та технології" ТНТУ ім. І. Пулюя: Тези доповідей. – Тернопіль, 15-16 травня, 2014. – С. 17.

Здобувачем виконані експериментальні дослідження та опрацьовані їх результати

АНОТАЦІЯ

Гладь С.В. Оцінка впливу дорнування отворів на довговічність елементів крила транспортного літака – рукопис

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – «Механіка деформівного твердого тіла». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2014.

Дисертацію присвячено виявленню основних закономірностей впливу відносного натягу дорнування ($i = 1\%, 2\%, 3\%$) та діаметру отвору ($d = 8 \text{ мм}, 10 \text{ мм}, 12 \text{ мм}$) на циклічну тріщиностійкість пластин із алюмінієвого сплаву Д16чТ і розробці методики прогнозування втомної довговічності силових конструктивних елементів крила транспортного літака.

Встановлено, що довговічність пластин до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм від отвору діаметром 8 мм та 10 мм за натягу дорнування $i = 1\%$ підвищується у 1,5-3 разів проти недорнованих пластин з отворами. Аналогічна залежність спостерігається для дорнування з натягом $i = 2\%$. З подальшим підвищенням натягу дорнування (до $i = 3\%$) довговічність до зародження втомної тріщини підвищується у 7-10 разів проти недорнованих пластин з отворами.

Обґрунтовані критерії циклічної міцності силових конструктивних елементів із зміцненими функціональними отворами. Основними критеріями для прогнозування довговічності пластин із дорнованими отворами діаметром 8 мм та 10 мм вибрано розмах напружень на циліндричній поверхні отвору $\Delta\sigma_{yy}$ та розмах напружень на відстані, що дорівнює зоні передруйнування d^* від циліндричній поверхні отвору $\Delta\sigma_{yy}^*$.

Розроблено конструктивно-технологічні рекомендації для підвищення втомної довговічності силових конструктивних елементів крила транспортного літака. Для отворів діаметром 8 мм, 10 мм та 12 мм оптимальним є натяг дорнування 3%. За рахунок значних пластичних деформацій досягаються високі залишкові напруження стиску на ділянці біля отвору, що значно зменшує напруження розтягу при циклічному навантажуванні.

Ключові слова: алюмінієвий сплав Д16чТ, натяг дорнування, тріщиностійкість, мікромеханізми руйнування, втомна довговічність.

АННОТАЦИЯ

Гладь С.В. Оценка влияния дорнования отверстий на долговечность элементов крыла транспортного самолета.- РУКОПИС.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела». - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2014.

Диссертация посвящена установлению основных закономерностей влияния натяга дорнования ($i = 1\%, 2\%, 3\%$) и диаметра отверстия ($d = 8 \text{ мм}, 10 \text{ мм}, 12 \text{ мм}$)

на зарождение и рост усталостных трещин при растяжении пластин из алюминиевого сплава Д16чТ, а также разработке методики прогнозирования усталостной долговечности силовых конструктивных элементов крыла транспортного самолета.

Проведен анализ методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния материала для оценки влияния локальных остаточных напряжений сжатия на зарождение и рост усталостных трещин. С увеличением относительного натяга дорнования увеличиваются остаточные напряжения сжатия, а также ширина участка сжимающих напряжений около отверстия. Выявлено, что остаточные напряжения сосредоточены в основном ближе к стороне выхода дорна.

Выявлено, что наименьшие локальные остаточные напряжения сжатия возникают с стороны входа дорна для всех исследованных натягов дорнования $i = 1\% - 3\%$, а наибольшие - в среднем участке отверстия, ближе к выходу дорна. С увеличением величины относительного натяга дорнования (от 1% до 3%) разница между наименьшими и наибольшими локальными остаточными напряжениями сжатия уменьшается.

Вычислено наибольшие и наименьшие локальные напряжения при циклическом упругопластическом деформировании растяжением алюминиевых пластины с центральным отверстием диаметром 8 мм, 10 мм после дорнования с натягом $i = 1\%, 2\%, 3\%$ методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS.

Методом конечных элементов исследовано влияние натяга дорнования ($i = 1\%, 2\%, 3\%$) на размах локальных напряжений вблизи функционального отверстия при циклическом одноосном растяжении.

Проведено фрактографические исследования пластин с отверстием диаметром 8 мм, 10 мм и 12 мм после дорнования с натягом $i = 1\%, 2\%, 3\%$ для идентификации места зарождения усталостной трещины. Проанализированы микромеханизмы зарождения и распространения усталостных трещин от функциональных отверстий. В дорнованных образцах трещина возникает на кромке отверстия, преимущественно со стороны входа дорна в отверстие, и распространяется в тело образца. Фронт усталостной трещины в образцах с отверстиями после механической обработки приближен к полуэллиптическому. Трещина зарождается преимущественно в среднем (по толщине) участке отверстия и распространяется в тело образца. Фронт трещины приобретает полуэллиптическую форму. Усталостная трещина в образцах с дорнованными отверстиями сначала не выходит на поверхность отверстия, а прорастает к противоположной стенке образца на расстоянии 1-2 мм от отверстия. При этом остается тонкая неразрушенная полоска вдоль отверстия, толщиной 1-2 мм. Такой эффект возникает в результате действия остаточных сжимающих напряжений вблизи отверстия дорнованных образцов.

Исследованы основные закономерности влияния пластического дорнования отверстий с относительным натягом $i = 1\% - 3\%$ на зарождение и распространение усталостных трещин в алюминиевом сплаве Д16чТ. Выявлено, что независимо от натяга дорнования трещины зарождаются от кромок пластически деформированных отверстий со стороны входа дорна.

Количество циклов до зарождения усталостной макротрещины на поверхности длиной 0,25 мм от отверстий увеличивается с повышением относительного натяга дорнования. Это обусловлено доминирующим влиянием остаточных сжимающих напряжений вблизи упрочненных отверстий. С повышением относительного натяга дорнования от 1% до 2% эффективный коэффициент интенсивности напряжений и скорость распространения усталостной трещины уменьшаются. Построены кинетические диаграммы усталостного разрушения исследуемых образцов в двойных логарифмических координатах.

Получены зависимости количества циклов до зарождения усталостной трещины в алюминиевых пластинах с центральным деформационно упрочненным отверстием от локальных максимальных напряжений σ_{yy} и размах локальных напряжений $\Delta\sigma_{yy}$ вблизи функционального отверстия диаметром 8 мм и 10 мм.

Выявлено, что дорнования с натягом $i = 1\%$ повышает долговечность пластин к зарождению усталостной трещины длиной 0,25 мм в 1,5-3 раз против недорнований пластин. Аналогичная зависимость наблюдается для дорнования с натягом $i = 2\%$. С дальнейшим повышением натяжения дорнования (до $i = 3\%$) долговечность к зарождению усталостной трещины повышается в 7-10 раз по сравнению с недорнованиями пластинами с отверстиями.

Обоснованные критерии циклической прочности силовых конструктивных элементов с упрочненными функциональными отверстиями. Основным критерием для прогнозирования долговечности пластин с дорнированными отверстиями диаметром 8 мм и 10 мм выбрано размах напряжений на цилиндрической поверхности отверстия $\Delta\sigma_{yy}$ и размах напряжений на расстоянии, равном зоне предразрушения d^* от цилиндрической поверхности отверстия $\Delta\sigma_{yy}^*$.

Разработаны конструктивно-технологические рекомендации для повышения усталостной долговечности силовых конструктивных элементов крыла транспортного самолета. Для отверстий диаметром 8 мм, 10 мм и 12 мм оптимальным является натяг дорнования 3%. За счет значительных пластических деформаций достигаются высокие остаточные напряжения сжатия на цилиндрической поверхности отверстия, существенно уменьшающие растягивающие напряжения при циклическом нагружении.

Ключевые слова: алюминиевый сплав Д16чТ, натяг дорнования, трещиностойкость, микромеханизмы разрушения, усталостная долговечность.

ABSTRACT

Glado S. Estimation of influence of burnishing holes on the durability of elements of transport aircraft wing - Manuscript

Dissertation is submitted for the scientific degree of Candidate of Sciences (Enginireeng) sciences, in specialty 01.02.04 - "Mechanics of deformable solids". - Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2014.

The thesis is devoted to revealing the basic laws influence the burnishing tension ($i = 1\%, 2\%, 3\%$) and hole diameter ($d = 8 \text{ мм}, 10 \text{ мм}, 12 \text{ мм}$) on the cyclic crack

resistance of aluminum alloy plates D16chT and developing methods of prediction of the fatigue durability strength of structural elements transport aircraft wing.

It is established that fatigue of plates to the initiation of crack length of 0.25 mm from 8 mm and 10 mm diameter hole for the burnishing tension $i = 1\%$ increased to 1.5-3 times against specimens without burnishing. A similar dependence is observed for the burnishing tension $i = 2\%$. With a further increase in burnishing tension (up to $i = 3\%$) fatigue to fatigue crack initiation increases 7-10 times against specimens without burnishing.

Criteria of cyclic durability of strength structural elements with established functional holes are substantiated. The main criterion for predicting the durability of the plates with burnished 8mm and 10mm diameter holes selected strains extend on the cylindrical surface of the hole $\Delta\sigma_{yy}$ stress at a distance equal to the prefracture zone d^* from the cylindrical surface of the hole $\Delta\sigma_{yy}^*$.

A constructive-technological recommendations for improving the fatigue of strength structural elements transport aircraft wing are developed. For 8mm, 10mm and 12mm diameter holes is optimal burnishing tension is $i = 3\%$. Due to the considerable plastic deformation are achieved high compressive residual stresses on the cylindrical surface of the hole, which considerably reduces the tensile stress under cyclic loading.

Keywords: aluminum alloy D16chT, burnishing tension, crack, fracture micromechanisms, fatigue durability.